**Revista CIENCIA** **Vol.19, 4, 413-430 (2017)**

# PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS OF MUISNE HOSPITAL

**R. Aguiar**

Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
Av. General Rumiñahui s/n Valle de los Chillos, Ecuador. rraguiar@espe.edu.ec
(2)Facultad de Ingeniería. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta Ecuador.

Received: July 2017. Accepted: September 2017

## ABSTRACT

By means of a probabilistic study of seismic hazard, of the site where the Muisne Hospital is being constructed, in the Province of Esmeraldas, Ecuador, two spectra are presented, for the horizontal component of soil movement, called design and maximum quake considered, which have periods of return of 475 and 975 years.

**Keywords**: Strong Movements. Seismic Hazard. Seismic Isolators.

# ANÁLISIS SÍSMICO PROBABILÍSTICO DEL HOSPITAL DE MUISNE

## RESUMEN

Mediante un estudio probabilístico de peligrosidad sísmica, del sitio donde se está construyendo el Hospital de Muisne, en la Provincia de Esmeraldas, en Ecuador, se presentan dos espectros, para la componente horizontal de movimiento del suelo, denominados de diseño y máximo sismo considerado, que tienen períodos de retorno de 475 y 975 años.

**Palabras Claves:** Movimientos Fuertes. Peligrosidad Sísmica. Aisladores Sísmicos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Si se diseña una viga simplemente armada y no se determina en forma adecuada la carga vertical que va a gravitar sobre ella, la viga estará mal diseñada a pesar de que el análisis se lo hizo con elementos finitos y que se comprobó el desempeño encontrando la curva momento-rotación, empleando un modelo de fibras.

La determinación en forma adecuada de las cargas a que va a estar sometida la estructura durante su vida útil es fundamental pero hay Proyectistas Estructurales que toman a la ligera esto de la cuantificación de las cargas y piensan que como están utilizando un programa mundialmente conocido como ETABS (o similares) la estructura está muy bien diseñada.

Es muy preocupante la ligereza, por decir lo menos, con que se están diseñando estructuras esenciales, sin estudios de Peligrosidad Sísmica y piensan que porque realizan un análisis no lineal con 7 sismos, la estructura está diseñada considerando la acción sísmica. Sísmica (2016); Yela y Chon (2017).

Concretamente se han diseñado dos Centros de Salud, el uno en Muisne, (en la zona del epicentro del terremoto del 16 de abril de 2016, de magnitud 7.8) y el otro en Piñas; con aisladores sísmicos (excelente decisión) pero sin estudios de peligrosidad sísmica que se puedan considerar adecuados.

Pero no es el único caso, sino que también se ha realizado un estudio para reforzar una estructura de altura, en la ciudad de Guayaquil, sin estudios de peligrosidad sísmica. Guerrero (2017)

En el diseño de un hospital o en el reforzamiento de un edificio de altura se debe definir en forma clara cuales son los espectros de aceleraciones y de desplazamientos que se van a utilizar, para dos sismos denominados: Espectro de Diseño **DE** y Espectro Máximo Considerado **MCE**

Una vez que se han definido estos espectros, se seleccionan sismos registrados a nivel mundial, en tectónicas similares a las del sitio del Proyecto y se realiza el escalamiento de los mismos, para un rango de período prefijado, utilizando cualquier modelo de cálculo o simplemente siguiendo las recomendaciones del ASCE 2010.

Para el caso de la ciudad de Guayaquil, existen varios trabajos de microzonificación sísmica que se pueden utilizar, de tal forma que si no se desea hacer un estudio de Peligrosidad Sísmica se debe recurrir a estos estudios, que en lugar de utilizar el espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15, a secas.

Habrá más de un lector que se asombrará con lo indicado en el último párrafo por lo que se va a presentar el caso de la ciudad de Quito. En la capital se han realizado a la fecha 5 estudios de peligrosidad sísmica; en 1994 y 2002 por la Escuela Politécnica Nacional; en 1997 por la ORSTRON; en 2012 por ERN y en 2017 por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.

Ahora bien, el NEC-15 presenta un solo valor para los factores de sitio: $F_a, F_d, F_s$, de aceleración, desplazamiento y de comportamiento de suelo; para un determinado tipo de suelo. Por ejemplo para un perfil de suelo tipo D, solo hay los tres valores para cualquier sitio de la ciudad; en cambio ERN-12 presenta valores de acuerdo a la ubicación del sitio. La respuesta es simple, ERN-12 determinó en base a perforaciones de 17 sitios en diferentes lugares de la ciudad sonde se llegó a más de 30 m, de profundidad, en base a estudios de campo y de escritorio se determinó los factores de sitio que están recogidas en Aguiar (2017,1).

Los factores de sitio de ERN-12 fueron adaptados a la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2011, que se utilizaba en ese entonces, aunque no haya sido promulgada en registro oficial. Los espectros de diseño de NEC-15 mantienen la forma de las ecuaciones del NEC-11, lo que cambia son los factores de sitio, de tal manera que se pueden utilizar los factores de sitio de ERN-12 con las ecuaciones espectrales del NEC-15.

En resumen, los factores de sitio de ERN-12 fueron obtenidos en base a estudios de los suelos de Quito, en cambio los del NEC-15 responden a investigaciones realizadas a nivel mundial.

La ciudad de Quito, se halla dividida en cinco zonas a saber: Sur, Centro Sur, Centro, Centro Norte y Norte. Para cada una de estas zonas en función del tipo de suelo se puede determinar espectros para la componente horizontal de movimiento de suelo, asociados a las fallas ciegas que atraviesan la ciudad: Puengasí, Ilumbisí-la Bota, Carcelén el Inca, Bellavista-Catequilla. Los mismos que se han determinado utilizando los modelos de: Campbell y Borzognia (2014), Abrahamson *et al.* (2014); Choiu y Young (2014). Estos espectros se hallan publicados en Aguiar *et al.* (2017,2).

Pero no solamente se debe trabajar con la componente horizontal de movimiento del suelo, sino también se debe contar con espectros asociados a la componente vertical, sobre todo cuando la estructura se halla muy cerca de una falla geológica (factores de cercanía) como sucede con la ciudad de Quito y para el efecto se han encontrado espectros para la componente vertical, para Quito, utilizando los modelos de Borzognia y Campbell (2014); Gülerce *et al.* (2014); Choiu y Young (2014). Estos espectros se hallan publicados en Aguiar *et al.* (2017,3).

De igual manera es importante definir espectros de desplazamientos, tanto para el sismo DE como para el MCE.

En este artículo únicamente se determinan los espectros de aceleración para el sitio donde se está construyendo el nuevo Hospital de Muisne con aisladores sísmicos, mediante un Análisis Probabilístico de la Peligrosidad Sísmica, conocido como PSHA, por sus siglas en inglés.

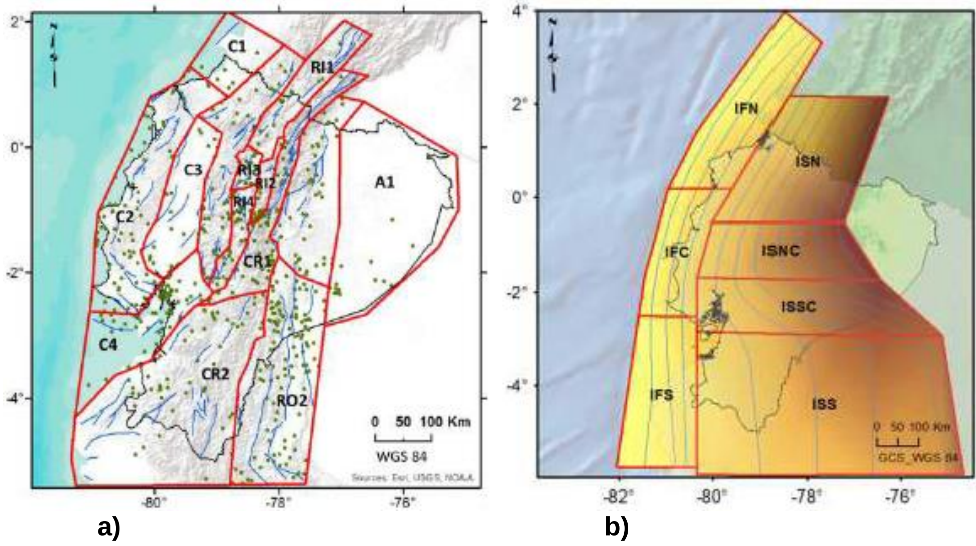
## 2. ZONAS FUENTES

Se define las zonas fuentes o zonas sismogenética a grandes volúmenes de litosfera en los cuales se tiene una sismicidad homogénea que es independiente de otras. Esto implica que todos los puntos del interior de la zona fuente llevan asociado un modelo de recurrencia en el que se espera una mínima y máxima magnitud, al igual que una tasa de ocurrencia que son propios de la zona fuente.

Para definir una zona fuente se tiene en cuenta en primer lugar el origen de los sismos, en este caso se tiene tres tipos de sismos: interplaca; intraplaca y corticales. La sismicidad y geología son otros factores importantes para delimitar una zona fuente.

A criterio del autor, el trabajo que representa el estado del arte, en esta temática es el desarrollado por Parra (2016) que tiene un soporte en los trabajos realizados por Aguiar y Castro (2009); Chunga (2010); Chunga *et al.* (2010) y Alvarado (2013) a más de ello ha hecho un estudio muy detenido en el catálogo sísmico depurando las réplicas de los eventos principales.

Parra (2016) considera 14 zonas fuentes asociados a sismos corticales, que se indican en la figura 1 a; 3 zonas interplaca de bajo ángulo de buzamiento que son las mostradas en la figura 1 b, caracterizada por generar mega terremotos de magnitud mayor a 8; y 4 zonas fuentes intraplaca (figura 1 b) que corresponden a una actividad sísmica de subducción profunda, a partir de 40 km, donde se producen sismos de magnitud moderada y alta pero como se encuentran a gran profundidad no causan daño.




**a)** **b)**

**Figura 1** Zonas Fuentes: a) Corticales; b) Interplaca e Intraplaca.

Para cada una de las fuentes sísmicas, Parra (2016) ajustó un modelo de recurrencia trabajando con los sismos registrados en cada zona y halló los parámetros del modelo de Gutenberg y Richter, los mismos que se indican en la tabla 1, que se utilizan para evaluar la amenaza sísmica empleando el programa CRISIS.

Muisne se halla en la zona fuente IFN donde se dio el terremoto de 1906 que tuvo una magnitud de 8.8; esto demuestra que Muisne se halla en la zona de mayor peligrosidad sísmica del Ecuador, por eso en parte es muy bueno que se haya decidido construir el hospital con aisladores sísmicos, ojala que las dimensiones y geometría de los aisladores sea la adecuada para que tengan los desplazamientos laterales que se esperan en terremoto similar al de 1906.

**Tabla 1** Parámetros de ajuste de la recta de Gutenberg-Richter (GR) para cada zona fuente del modelo de Parra. Fuente: Parra (2016)

| ÁREA FUENTE | CÓD. | ÁREA | $m_0$ | Mmax | Δ | α | β | αβ | N($m_0$) | N($m_0$)/ÁREA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sismicidad Cortical** | | | | | | | | | | |
| Costa 1 | C1 | 12950 | 4 | 5,9 | 1,2 | 10,74 | 1,99 | 1,65 | 0,32 | 2,47E-05 |
| Costa 2A* | C2A | 41619 | 4 | 4,8 | 0 | 17,42 | 2,96 | 0,29 | 2,54 | 6,10E-05 |
| Costa 2B* | C2B | 41619 | 4,9 | 6,8 | 0,4 | 10,96 | 1,59 | 0,7 | 0,27 | 6,44E-06 |
| Costa 3 | C3 | 19402 | 4 | 7 | 0,2 | 15,65 | 3,03 | 0,95 | 0,68 | 3,49E-05 |
| Costa 4A* | C4A | 24492 | 4 | 4,6 | 0 | 17,85 | 3,33 | 0,43 | 1,82 | 7,44E-05 |
| Costa 4B* | C4B | 24492 | 4,7 | 6,9 | 0,3 | 13,29 | 2,3 | 1,14 | 0,24 | 9,60E-06 |
| Western Cordillera | CO1 | 24433 | 4 | 6,7 | 0,5 | 15,72 | 2,88 | 0,52 | 1,31 | 5,35E-05 |
| Región Interandina 1 | RI1 | 14389 | 4 | 6,9 | 0,4 | 7,96 | 0,98 | 0,31 | 0,26 | 1,79E-05 |
| Región Interandina 2 | RI2 | 3035 | 4 | 5,8 | 0,8 | 18,52 | 3,77 | 0,95 | 0,62 | 2,04E-04 |
| Región Interandina 3 | RI3 | 2778 | 4 | 6,6 | 0,3 | 9,41 | 1,47 | 0,47 | 0,34 | 1,20E-04 |
| Región Interandina 4 | RI4 | 6200 | 4 | 6,7 | 0,9 | 11,29 | 1,6 | 0,27 | 0,6 | 9,71E-05 |
| Cordillera Real 1 | CR1 | 18107 | 4 | 6,8 | 0,6 | 13,25 | 1,86 | 0,21 | 1,51 | 8,36E-05 |
| Cordillera Real 2 | CR2 | 74991 | 4 | 6,9 | 0,4 | 18,16 | 3,45 | 0,54 | 1,55 | 2,07E-05 |
| Región Oriental 1 | RO1 | 27569 | 4 | 6,8 | 0,3 | 15,59 | 2,83 | 0,46 | 1,4 | 5,07E-05 |
| Región Oriental 2 | RO2 | 47101 | 4 | 7,1 | 0,4 | 15,09 | 2,15 | 0,19 | 2,95 | 6,25E-05 |
| Región Amazónica | A1 | 60682 | 4 | 5 | 0,2 | 12,68 | 2,43 | 1,21 | 0,38 | 6,23E-06 |
| | | | | | | | | | | |
| **Sismicidad Interfase** | | | | | | | | | | |
| Interfase Norte A* | IFN_A | 59914 | 4 | 5,9 | 0 | 14,06 | 1,87 | 0,1 | 6,61 | 1,10E-04 |
| Interfase Norte B* | IFN_B | 59914 | 6 | 8,8 | 0,7 | 8,74 | 1 | 0,37 | 0,14 | 2,37E-06 |
| Interfase Centro A* | IFC_A | 39396 | 4 | 5,3 | 0 | 14,55 | 2,09 | 0,14 | 4,48 | 1,14E-04 |
| Interfase Centro B* | IFC_B | 39396 | 5,4 | 7,9 | 0,1 | 10,29 | 1,3 | 0,39 | 0,24 | 6,12E-06 |
| Interfase Sur | IFS | 59122 | 4 | 7,5 | 0,4 | 13,99 | 1,87 | 0,11 | 6,21 | 1,05E-04 |
| | | | | | | | | | | |
| **Sismicidad in-Slab** | | | | | | | | | | |
| In-slab Norte | ISN | 81870 | 4 | 7,2 | 0,4 | 10,49 | 1,54 | 0,29 | 0,69 | 8,43E-06 |
| In-slab Norte Centro | ISNC | 49806 | 4 | 7 | 0,5 | 12,18 | 1,64 | 0,17 | 2,65 | 5,33E-05 |
| In-slab Sur Centro | ISSC | 66315 | 4 | 7,5 | 0,1 | 13,47 | 1,82 | 0,12 | 4,44 | 6,70E-05 |
| In-slab Sur | ISS | 202155 | 4 | 7,7 | 0,2 | 13,21 | 1,67 | 0,09 | 6,41 | 3,17E-05 |

Notación: *, Zonas con ajustes dobles; **Área:** área de la zona fuente ($km^2$); $m_o$: magnitud mínima para la tasa; $M_{max}$: $M_w$ máxima esperada; α y β: parámetros de la relación Gutenberg-Richter; **σ β**: sigma de Beta; **Ñ($m_o$): tasa de eventos con $M_w \geq m_o$; Ñ($m_o$)/ÁREA:** tasa de eventos con **$M_w \geq m_o$** dividido entre el área de la zona fuente.

## 3. MODELOS DE MOVIMIENTOS FUERTES

Los modelos de movimientos fuertes indicados en el apartado 1, sirven exclusivamente para sismos corticales debido al origen de la base de datos con que fueron formulados. Por cierto, estos modelos tienen un respaldo teórico y un respaldo de varios miles de registros de movimientos del suelo ocurridos en terremotos registrados en diferentes partes del mundo (La mayor parte de ellos en USA y Japón).

Para sismos interplaca e intraplaca existen otros modelos como los propuestos por Abrahamson *et al.* (2016) o el desarrollado por Haendel *et al.* (2015) que utiliza datos de sismos de Chile.

Es muy grande la lista de modelos de movimientos fuertes que han sido publicados en los últimos 11 años y todos ellos son considerados clase A, digamos así para destacar que son muy confiables. (Douglas 2016).

En un estudio de peligrosidad sísmica se puede trabajar con diferentes modelos; por ejemplo con el de Abrahamson *et al.* (2016) para los sismos interplaca e intraplaca y con el modelo de Campbell y Borzognia (2014), para los sismos corticales. Todo depende de los criterios de selección de acuerdo al sitio de interés y del grado de conocimientos de los modelos.

Se puede considerar un árbol lógico en la evaluación de la peligrosidad sísmica, en el sentido de que se pueden tener varias ramas con diferentes modelos de atenuación. Para el reforzamiento de estructuras de Manta afectadas por el terremoto del 16 de abril de 2016; se trabajó con tres ramas. Aguiar *et al.* (2016).

En este estudio se va a considerar una sola rama y se utilizará el modelo de Zhao *et al.* (2006) que permite encontrar leyes de atenuación del movimiento del suelo para sismos: interplaca, intraplaca y corticales.

Por cierto, en la figura 2, se presentan las aceleraciones máximas registradas en diferentes estaciones, durante el terremoto del 16 de abril de 2016 de Ecuador; en el eje horizontal se tiene la variable $R_{rup}$ que es la distancia del plano de falla a la estación.

En la figura 2, se ha dibujado con línea continua el valor medio que reporta el modelo de Zhao *et al.* (2006) para un perfil de suelo tipo D, el nivel de confiabilidad que se tiene al trabajar con la media es del 50%; con líneas entrecortadas se tiene el valor medio más (curva superior) y menos (curva inferior) una desviación estándar con lo que el nivel de confiabilidad es del 84%.

Ahora bien, no todas las estaciones que registraron el terremoto de 2016, se encuentran en un perfil tipo D, por citar algo los registros de Manta fueron obtenidos en un perfil de suelo tipo C; pero la mayor parte de estaciones se hallan en perfil tipo D.

Se ha presentado las curvas de atenuación de movimiento del suelo para cuatro períodos a saber: 0 s.; 0.2 s; 1.0 s; y 3.0 s. Las ecuaciones de movimientos fuertes presentan tablas que definen la atenuación del suelo para un número determinado de períodos de vibración; algunos modelos consideran pocos períodos de tal manera que los espectros que se obtienen son segmentos de rectas; otros trabajan con una mayor cantidad de períodos y se obtienen curvas.

Bueno, lo importante de la figura 2 y para justificar porque se seleccionó el modelo de Zhao *et al.* (2006) en este estudio, es que en el rango definido por las dos desviaciones estándar la mayor parte de puntos de aceleraciones máximas se encuentran en ese intervalo, de tal manera que es muy adecuado utilizarlo sobre

todo para un sitio como Muisne, donde la mayor contribución a la peligrosidad sísmica vendrá de las interplaca.

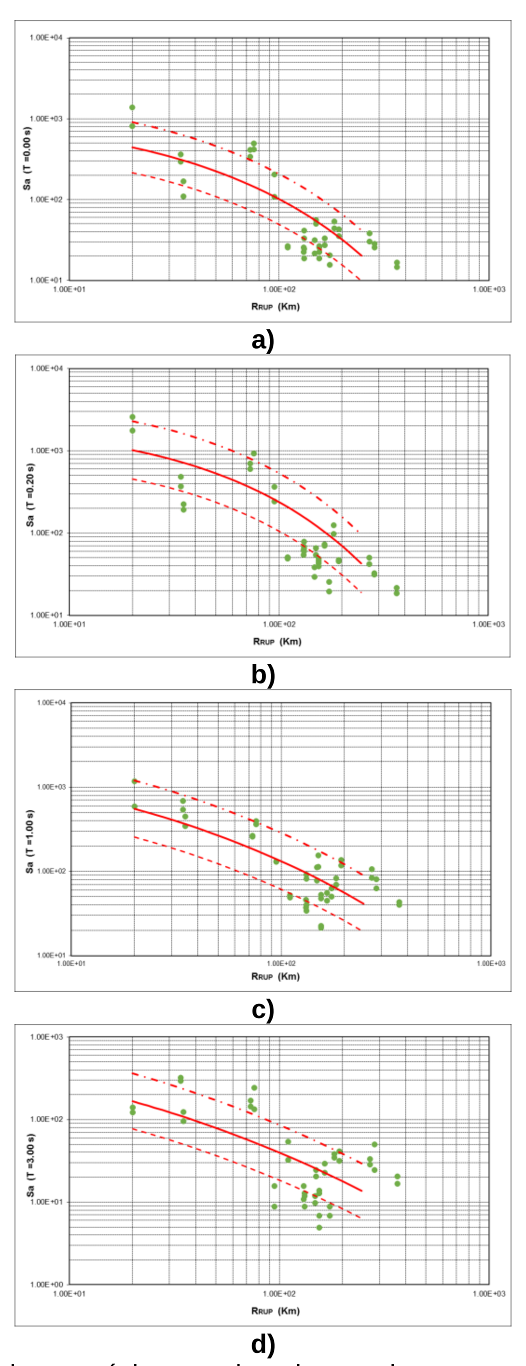



**Figura 2** Aceleraciones máximas registradas en el terremoto del 16 de abril de 2016, en Ecuador y predicción con el modelo de Zhao *et al.* (2006) para períodos de: a) T=0 s.; b) T=0.20 s; c) T=1.0 s; d) T=3.0 s. Fuente: Aguilar (2016).

## 4. CURVAS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA

En la figura 3, se presenta la curva de Peligrosidad Sísmica hallada para el sitio del Hospital de Muisne; que se obtuvo con el programa CRISIS (Ordaz *et al.* 2013). En el eje horizontal se tiene la aceleración del suelo, expresada como una fracción de la gravedad y en el eje vertical la probabilidad de excedencia. Se presentan varias curvas para diferentes períodos, desde 0.0 hasta 3.0 s.

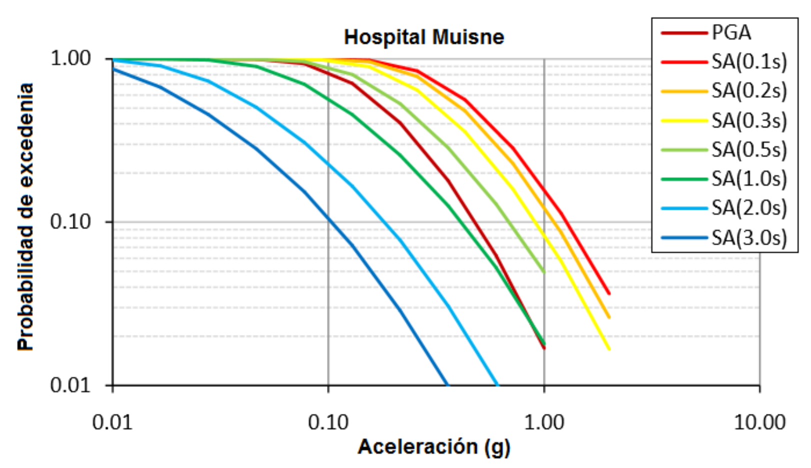


**Figura 3** Curvas de Peligrosidad Sísmica para sitio de Hospital de Muisne

Con las curvas de Peligrosidad Sísmica se hallan los Espectros de Peligro Uniforme o Espectro UHS (**U**niform **H**azard **S**pectrum) para cualquier período de retorno. Para el efecto se procede de la siguiente manera se saca la inversa del período de retorno y se ingresa a las ordenadas de la figura 3, con este valor se traza una línea horizontal que corta las curvas mostradas para diferentes períodos; con los puntos de corte se ve en las abscisas de la figura 3 la aceleración con la cual se obtiene el espectro.

El período de retorno $T_r$ es una definición estadística que se encuentra con la siguiente ecuación.

$$T_r = -\frac{t}{\ln(1-P)} \quad (1)$$

Siendo $T_r$ el período de retorno; $t$ el tiempo o la vida útil de la estructura y $P$ la probabilidad de excedencia. Si en la ecuación (1) se remplaza $t = 50$ (Vida útil de un edificio) y $P = 0.10$, se encuentra $T_r = 475$ años. Ahora bien si se mantiene la misma vida útil pero la probabilidad de excedencia disminuye a 5% y 2% los períodos de retorno que se obtienen son de 975 y 2475 años respectivamente.

En este momento toca decidir con que períodos de retorno se trabaja. Considerando que el Hospital de Muisne, está diseñado para una capacidad de 10 camas; se estima adecuado, considerar como sismo de diseño DE, 475 años y como sismo MCE 975 años, igual que si se tratara de un edificio para viviendas u oficinas.

Se han presentado curvas de peligrosidad sísmica en roca, de tal manera que los espectros UHS, que se hallen son para roca, los mismos que se modificarán considerando el tipo de suelo del Hospital de Muisne.

No conviene tener estructuras flexibles, aunque se hallen sobre aisladores sísmicos por dos motivos, el principal se va a deformar demasiado durante un terremoto y van a generar daño en los elementos no estructurales como la mampostería y esto va a alarmar a la población. Dependiendo del daño a lo mejor se suspende la atención hospitalaria y eso no es conveniente.

El otro motivo es que al ser muy flexible la estructura el efecto $P - \Delta$ va a ser importante y eso no es conveniente ya que se incrementan los desplazamientos laterales.

La estructura con los aisladores sísmicos debe tener derivas de piso menores a 0.5 para el sismo MCE. Por esto se recomienda que el período de vibración de la estructura con aisladores sea menor a 3.segundos, que es el valor máximo de las curvas de peligrosidad indicadas en la figura 3, pero se pudo haber colocado las curvas para 4 o 5 segundos de período.

## 5. ESPECTROS UHS EN ROCA

En la figura 4, se presenta los espectros de peligro sísmico uniforme, encontrados para el sitio del Hospital de Muisne, en roca. Por lo tanto, estos espectros deben modificarse considerando el tipo de suelo, tema que se presenta en el siguiente apartado.

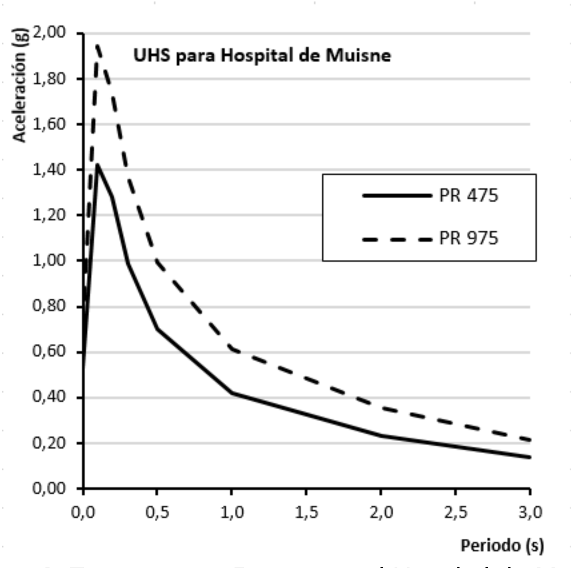
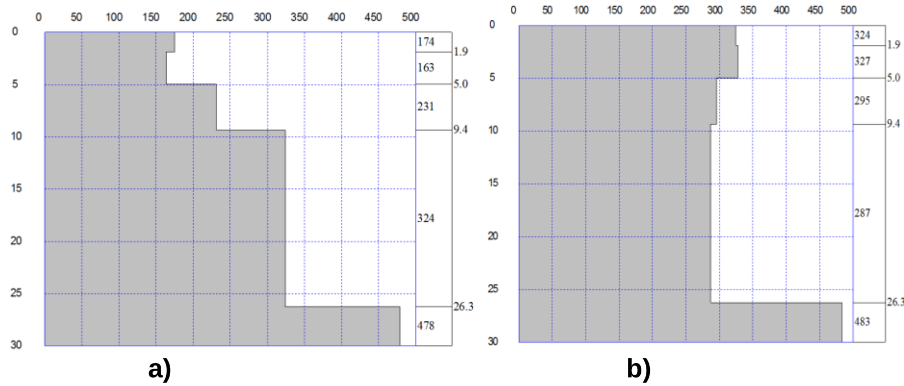



**Figura 4** Espectros en Roca para el Hospital de Muisne.

Se ha presentado espectros para períodos de retorno de 475 y 975 años que corresponden a los sismos **DE** y **MCE.**

## 6. SÍSMICA DE REFRACCIÓN Y PERÍODO DEL SUELO

Se realizaron dos líneas sísmicas de 55 m, y 110 m, siguiendo la norma ASTM D5777-00. La toma de datos se realizó de dos maneras; la activa en que la excitación viene dada por una fuerza de impacto (mediante un combo) y la pasiva mediante vibración ambiental. Bonifaz y Haro (2017).




**a)** **b)**

**Figura 5** Resultados hallados con el Método Combinado; a) Línea Sísmica 1, con $V_{s30} = 276.1\frac{m}{s}$; b) Línea Sísmica 2, con $V_{s30} = 310.4\frac{m}{s}$.
Fuente: Bonifaz y Haro (2017)

En la figura 5 se indican los resultados que se hallan al aplicar el Método Combinado; con los resultados de los métodos Activo y Pasivo. En la línea sísmica 1, la velocidad de la onda de corte en los primeros 30 metros es: $V_{s30} = 276.1\frac{m}{s}$; en la línea sísmica 2, que es aproximadamente ortogonal a la línea 1, la velocidad de la onda de corte es $V_{s30} = 276.1\frac{m}{s}$. De acuerdo a la clasificación de suelos de la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2015, el suelo del Hospital de Muisne es **tipo D.**

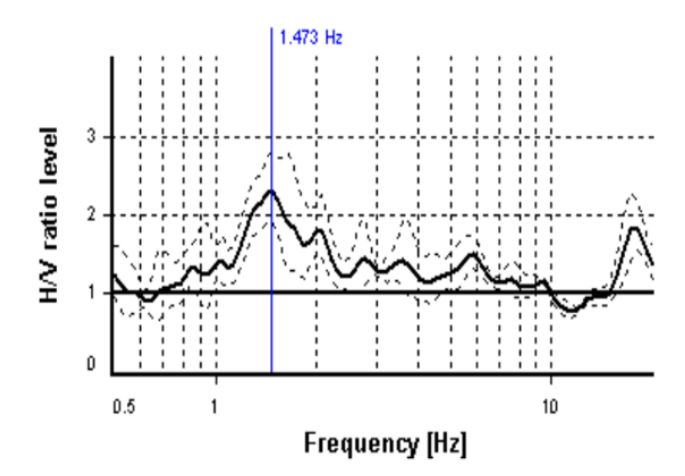



**Figura 6** Frecuencia de vibración del suelo, aplicando el Método de Nakamura.
Fuente: Bonifaz y Haro (2017).

Por otra parte, se determinó el período de vibración del suelo y se encontró que es de $T_s = 0.68\ s$. (Se encuentra sacando la inversa de la frecuencia 1.473 Hz) de tal manera que no es un suelo bueno ya que el período de vibración es un poco alto.

## 7. ESPECTROS DE DISEÑO Y MÁXIMO CONSIDERADO

La guía NERHP (2009) proporciona factores de amplificación del espectro en roca, para diferentes tipos de suelo y en función de la aceleración del suelo; los mismos que se emplean para encontrar los espectros en suelo tipo D, a partir del espectro en roca.

En la primera columna de la tabla 1, se indican los períodos de vibración (valores que considera el modelo de Zhao *et al.* 2006); en las columnas 2 y 3 se indica las aceleraciones espectrales para el movimiento horizontal del suelo, encontrados del estudio de peligrosidad sísmica; en la cuarta y quinta columna se tiene los factores de sitio recomendados por NEHRP (2009); finalmente en las dos últimas columnas se presenta las aceleraciones del espectro para el sismo de diseño y para el sismo máximo considerado, expresados en función de la gravedad.

**Tabla 1** Aceleraciones espectrales en roca y en suelo tipo D en función de la aceleración de la gravedad.

| | En roca | | NEHRP (2009) | | Suelo tipo D | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $T$ (s) | $T_r = 475$ años | $T_r = 975$ años | $T_r = 475$ años | $T_r = 975$ Años | $T_r = 475$ años | $T_r = 975$ años |
| 0.0 | 0.53 | 0.71 | 1.0 | 1.0 | 0.53 | 0.71 |
| 0.1 | 1.42 | 1.94 | 1.0 | 1.0 | 1.42 | 1.94 |
| 0.2 | 1.28 | 1.74 | 1.0 | 1.0 | 1.28 | 1.74 |
| 0.3 | 0.99 | 1.37 | 1.1 | 1.0 | 1.09 | 1.37 |
| 0.5 | 0.70 | 0.99 | 1.2 | 1.1 | 0.84 | 1.09 |
| 1.0 | 0.42 | 0.61 | 1.6 | 1.5 | 0.67 | 0.92 |
| 2.0 | 0.23 | 0.35 | 2.0 | 1.7 | 0.46 | 0.60 |
| 3.0 | 0.14 | 0.21 | 2.3 | 2.0 | 0.32 | 0.42 |
| 4.0 | 0.08 | 0.13 | 2.5 | 2.3 | 0.20 | 0.28 |
| 5.0 | 0.05 | 0.07 | 2.6 | 2.4 | 0.10 | 0.14 |

El NEC-15 indica que para la Costa el PGA (Peak Ground Acceleration) debe ser mayor o igual a $0.5\ g$; en el estudio se halló que el PGA es $0.53\ g$ (Valor de la aceleración del suelo para un período igual a 0 s., con un período de retorno de 475 años.

En la figura 7 se presentan los espectros encontrados en el estudio de peligrosidad sísmica en forma probabilística para los sismos **DE** y **MCE**.

Si no se realizaba el estudio de peligrosidad sísmica y se empleaban los espectros del NEC-15, se habría obtenido los que se presentan en la figura 8. Una buena parte de Proyectistas Estructurales determinan el sismo MCE multiplicando el sismo de diseño por 1.5; de esta manera se halló el espectro del NEC-15 para el sismo MCE.

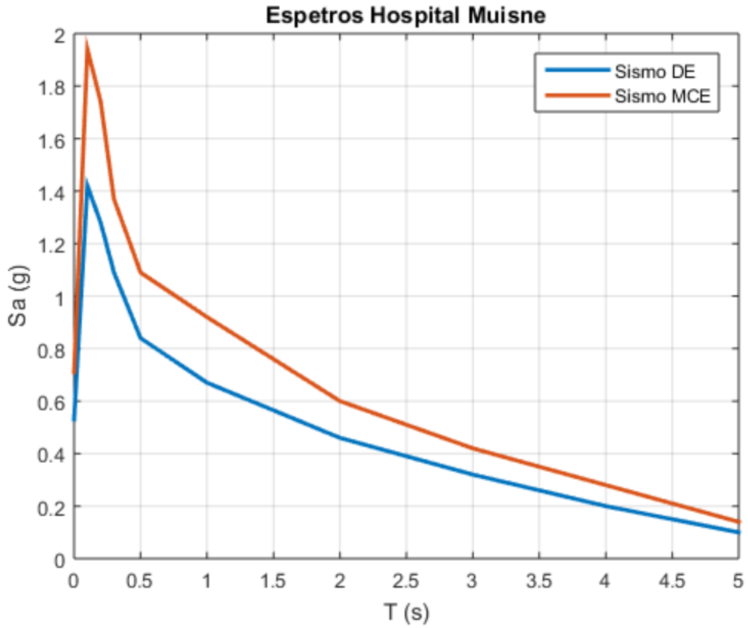



**Figura 7** Espectros de Diseño **DE** y Máximo Considerado **MCE**.

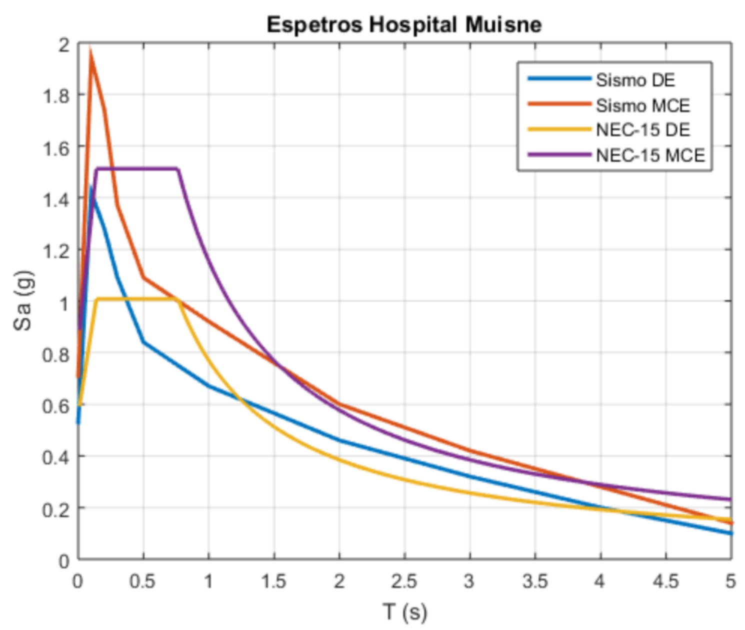
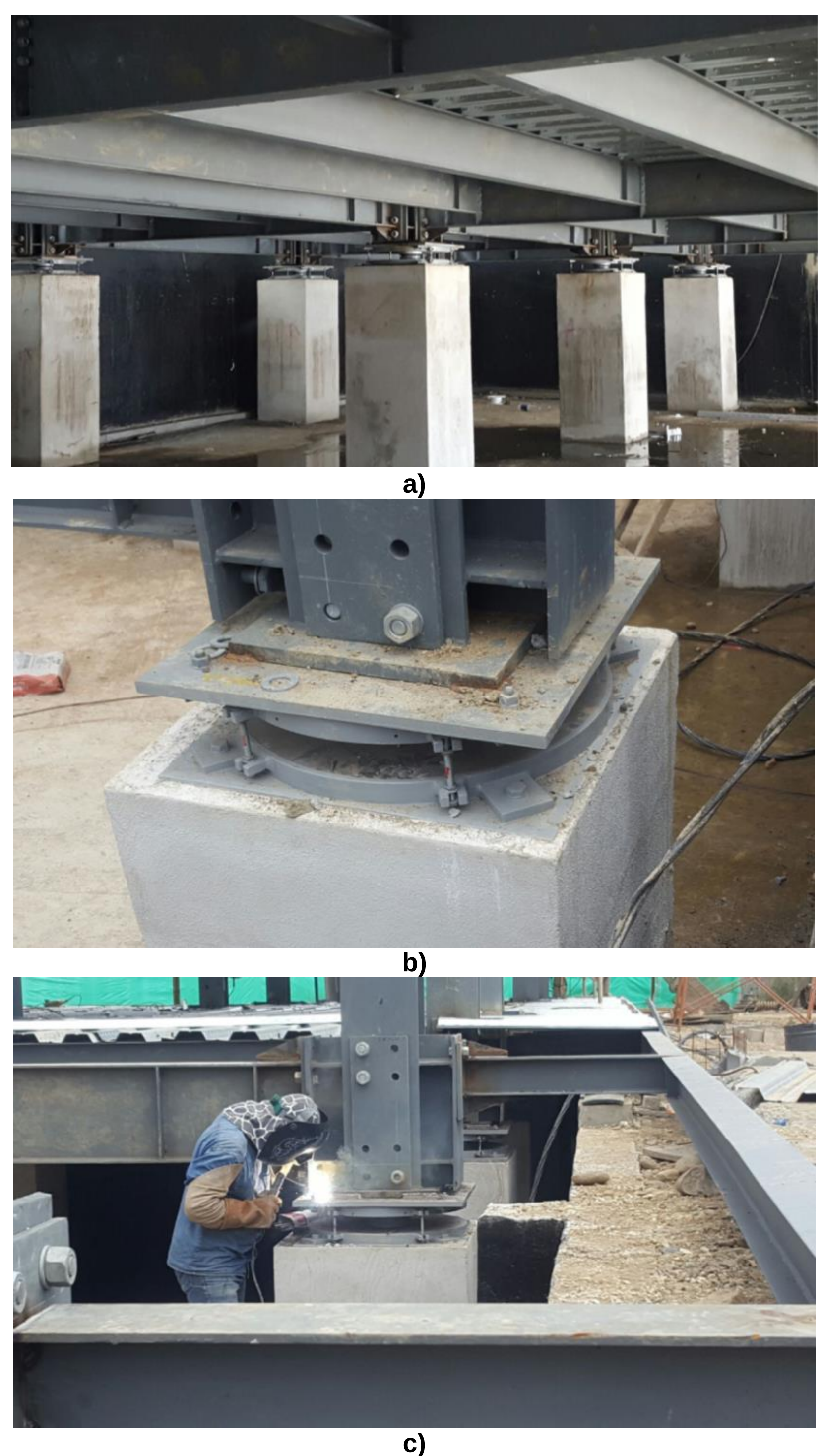



**Figura 8** Espectros encontrados en estudio de peligrosidad sísmica y los que reporta el NEC-15 para Muisne.

Las plataformas de aceleración máxima del NEC-15 reporta valores bajos, eso quedo de manifiesto en el terremoto del 16 de abril de 2016, de magnitud 7.8, de Ecuador. (Aguiar *et al.* 2016). Esto también se refleja en la figura 8, por eso es necesario en obras importantes realizar estudios de peligrosidad sísmica.



a)

b)

c)

**Figura 9** Hospital de Muisne con aisladores de doble curvatura; a) Sub estructura con columnas de hormigón sin vigas de acople; b) Unión de aislador a columna inferior y superior; c) Trabajos de soldadura sobre aislador.

## 8. AISLADORES SÍSMICOS DE HOSPITAL DE MUISNE

Las fotografías de la figura 9, fueron tomadas en Agosto de 2017 y de alguna forma refleja el estado de la construcción del Hospital de Muisne, las mismas que son comentadas a continuación.

En la figura 9 a, se ve que los aisladores sísmicos fueron colocados sobre las columnas de hormigón armado de la Planta Baja; lo que llama la atención es que no se construyó vigas de amarre de las columnas, para que toda la subestructura se desplace lo mismo horizontalmente. Antes de continuar con el comentario se debe manifestar que existen construcciones en que no han colocado vigas de unión de las columnas de hormigón armado. De tal manera que no es obligatorio su construcción; así como está cada columna va a desplazarse independientemente, es verdad que el desplazamiento lateral de estas columnas es muy bajo.

En la figura 10, se presenta un caso similar al del Hospital de Muisne y corresponde a uno de los Bloques Estructurales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en que la superestructura es de acero y la subestructura tiene columnas de hormigón armado; en esto es similar pero constructivamente hay algunas diferencias, la primera es que las columnas de hormigón están unidas con vigas de acero de menor sección transversal que las vigas del sistema de aislación; como se indicó en el Hospital no se han colocado estas vigas.



**Figura 10** Aislador de triple péndulo de fricción colocado sobre una canastilla y con vigas de acople de columnas. Construcción en la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, en el Valle de los Chillos.

Otra diferencia entre la figura 9 a, y 10, es que en la construcción de la ESPE, sobre las columnas de hormigón armado se tiene una canastilla, elemento de hormigón armado de mayor dimensión de la columna para garantizar que el aislador no quede en el borde de la columna, como se tiene en la figura 9 b.

En la ESPE, sobre la placa superior del aislador se colocó otra placa de acero del mismo tamaño; en la figura 9 b, se observa que colocaron una placa de acero de menor tamaño que la placa de acero del aislador; el inconveniente que se tiene es que en el Hospital los pernos de anclaje no atraviesan la placa colocada sobre el aislador. Ahora véase la figura 10, los pernos de anclaje superior atraviesan la placa superior.

Por otro lado, los pernos de anclaje de los aisladores de la ESPE, son de aproximadamente 30 cm, de longitud; en cambio los del Hospital tienen muy poca longitud y diámetro.

En la figura 9 c, se encuentra un operario soldando, con el aislador instalado; esto no sucedió en la ESPE, debido a que la placa superior que va sobre el aislador, llegó al Proyecto ya soldada a la columna rectangular de acero, de tal manera que lo único que se colocó en obra, fueron los pernos de anclaje. En el caso de la ESPE, no era necesario colocar una placa superior sobre el aislador, ya que el espesor de la placa del aislador es suficiente para resistir las cargas que llegan al aislador. (Constantinou *et al.* 2016), pero se colocó la placa superior para que la columna se suelde en esa placa y no en la del aislador.

Se destaca que el objetivo principal del artículo es el estudio de peligrosidad sísmica pero era necesario realizar estos comentarios, ya que existen otros hospitales que se van a construir con aisladores sísmicos.

## 9. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Definitivamente, después del terremoto de Ecuador del 2016, tiene que cambiar la forma de diseñar y construir estructuras; se debe dejar dar paso a las estructuras rígidas con muros de corte, en lugar de las estructuras flexibles conformadas por vigas y columnas.

Se debe dar paso a la construcción de estructuras con disipadores de energía o con aisladores sísmicos. Por eso se ve con buenos ojos que el Hospital de Muisne haya sido diseñado con aisladores sísmicos pero se lo debe hacer muy bien. En este artículo únicamente se tocó el tema de la Peligrosidad Sísmica y se ha presentado dos espectros obtenidos para el sitio del Hospital, para ello se hizo un estudio de sísmica de refracción y se determinó la velocidad de la onda de corte $V_{s30}$; mediante el método de Nakamura se obtuvo el período de vibración del suelo.

En el estudio de Peligrosidad Sísmica se determinó solamente los espectros de aceleraciones para el movimiento horizontal del suelo, para el Sismo de Diseño y para el Sismo Máximo Considerado, que tienen períodos de retorno de 475 y 975 años. No se presentó espectros de desplazamientos o espectros para la componente vertical de movimiento del suelo, porque el Hospital ya está en construcción.

Los espectros obtenidos presentan ordenadas espectrales más altas que los que se encuentran con la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2015, para la zona de períodos cortos.

## REFERENCIAS

1. Abrahamson N., Silva W., Kamai R. (2013), *Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set.* Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 143 p.
2. Abrahamson N., Silva W., Kamai R., (2014), “Summary of the ASK14 ground motion relation for active cristal regions”, Earthquake Spectra, **30 (3),** 1025-1055.
3. Abrahamson N., Greqor N., and Addo K., (2016) “BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes”, *Earthquake Spectra.*
4. Aguiar R., (2017,1), *Microzonificación Sísmica de Quito,* Segunda Edición. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH, 189 p. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Roberto_Aguiar2
5. Aguiar R., Rivas-Medina A., Caiza P., Quizanga D., (2017,2), “Control spectra for Quito”, *Natural Hazards and Earth System Sciences,* **17,** 397-407.
6. Aguiar R., López E., Quizanga D., (2017,3), “V/H spectral ratios associated with reverse faults of Quito city”, *Boletín de Ciencias de la Tierra.* Universidad Nacional de Colombia, 11 p. Medellín, Colombia.
7. Aguiar R., Zevallos M., Palacios J., García L., Menéndez E., (2016,3), *Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía. Terremoto de Ecuador del 16 de abril de 2016,* Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH, 283 p. Portoviejo, Ecuador. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Roberto_Aguiar2
8. Aguiar R., Castro C., (2009), “Zonas fuentes para estudios de peligrosidad sísmica en el Ecuador”, *Antología Científica de Ingeniería Estructural y Sísmica en Países Andinos. Consulado del Perú en el Ecuador.,* 87-111, Guayaquil.
9. Aguilar Z., (2016), *Aspectos sismológicos del terremoto de Muisne del 16/04/2016,* Conferencia dictada en el Colegio del Perú. Consejo Departamental de Lima. Capítulo de Ingeniería Civil, Lima.
10. ASCE/SEI 7-10 (2010), *Minimum design loads for buildings and other Structures,* American Society of Civil Engineers, 247 p.
11. Bonifaz H., Haro J., (2017), *Estudio Geofísico de Hospital de Muisne,* Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 20 p. Sangolquí.
12. Bozorgnia y Campbell, (2013), NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions. Report PEER 2013/24, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 85-123 p.
13. Campbell K., Bozorgnia Y., (2013), *NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV and 5%-Damped elastic Pseudo-Acceleration response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec,* Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 75 p. University of California, Berkeley, CA.

14. Campbell K., Borzognia Y., (2014), "NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra", Earthquake Spectra, **30 (3),** 1087-1115
15. Constantinou M., Aguiar R., Morales E., Caiza P., (2016), "Desempeño de aislador FPT8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del Centro de Investigaciones y de Post Grado", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* **21, 1,** 1-25. Disponible en: http://www.riie.espe.edu.ec
16. Choiu B., Youngs R., (2013), *Update of the Choiu and Youngs NGA ground motion model for average horizontal component of peak ground motion and response spectra, PEER Report 2013/07*, 105 p., Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
17. Choiu B., Youngs R, (2013), NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions. Report PEER 2013/24, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 127-160 p.
18. Chunga K. (2010). Shallow crustal earthquakes and seismic zonation for Ecuador. Ph.D. Thesis. University of Insubria. Italy. 165 p.
19. Chunga et al. (2010). Identificación de nudos sismogénicos capaces de generar potenciales terremotos con M>6 y M>6.5 en las regiones colinares y cadenas montañosas de los Andes Septentrionales. RTE – ESPOL. 39 p.
20. Douglas (2016), *Ground motion prediction equations 1964-2016,* www.gmpe.org.uk/
21. ERN-2012, *Microzonificación sísmica del distrito metropolitano de Quito: Estudio de la amenaza sísmica a nivel local.* Programa para la reducción de riesgos urbanos. Distrito Metropolitano de Quito.
22. Guerrero P., (2017), "SIBHIALTA: Riesgo sísmico en el Edificio VIHCAR de la ciudad de Guayaquil", Conferencia dictada el 26 de Julio de 2017, en la Universidad Central del Ecuador. *Tercer Congreso Internacional de Estructuras.*
23. Gülerce Z., Kamai R., Abrahamson N., Silva W., (2013), NGA-West2 Ground Motion Prediction Equations for Vertical Ground Motions., Report PEER 2013/24, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, 3-48p.
24. Haendel A., Specht S., Kuehn N., and Scherbaum F., (2015), "Mixture of ground-motion prediction equations as backbone models for a logic tree: an application to the subduction zone in Northern Chile", *Bulletin of Earthquake Engineering,* **13 (2),** 483-501.
25. NEC-15 (2015) *Norma Ecuatoriana de la Construcción, SE-DS, Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente.* 138 p. Quito.
26. NEHRP (2009), Council, B. S. S., (2009), *NEHRP recommended seismica provisions for new buildings and other structures,* Federal Emergency Management Agency.
27. Ordaz M., Martinelli F., D'Amico V., and Maletti C., (2013), "CRISIS2008: A flexible tool to perform probabilistic seismic hazard assessment", *Seismological Research Letters,* **84 (3),** 495-504.
28. Parra H., (2016), *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la Peligrosidad Sísmica en el Ecuador continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito,* Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

29. Sísmica (2016), *Memoria Técnica de Hospital de Bahía de Caráquez con aisladores sísmicos,* Sísmica Ingenieros Consultores, 45 p.
30. Yela R., Chon C., (2017), *Memoria de análisis y diseño estructural. Edificación: Hospital Principal General de 30 camas,* Memoria de Cálculo, 34 p.
31. Zhao J., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Ouchi T., Takahashi T., … and Fukushima Y., (2006), "Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period", *Bulletin of the Seismological Society of America,* **96 (3),** 898-913.